

論文 鉄鋼スラグ水和固化体の pH が強度および耐久性に及ぼす影響

藤井 隆史^{*1}・田中 秀和^{*2}・綾野 克紀^{*3}・阪田 憲次^{*4}

要旨：鉄鋼スラグ水和固化体は、製鉄所の副産物である高炉スラグ微粉末および製鋼スラグを主な原料とし、必要に応じてアルカリ刺激材等を添加して製造される。本研究によって、鉄鋼スラグ水和固化体の強度は、水粉体比の他に、練混ぜ直後の pH にも依存することが分かった。さらに、練混ぜ直後の pH をセメントコンクリートと同程度にすることで、強度のばらつきが小さく、安定して鉄鋼スラグ水和固化体を製造できることが分かった。また、鉄鋼スラグ水和固化体の耐中性化および耐鉄筋腐食性は、製鋼スラグのアルカリ性によって、長期にわたって高い性能を示すことが分かった。

キーワード：鉄鋼スラグ水和固化体、製鋼スラグ、pH、圧縮強度、中性化

1. はじめに

環境問題への関心が高まる中、産業副産物や廃棄物を利用した新しい材料・工法の研究が活発に行われている。製鉄所からは、年間約 3,600 万トンの鉄鋼スラグが副産物として発生している¹⁾。鉄鋼スラグ水和固化体は、製鋼スラグおよび高炉スラグ微粉末を主原料とし、必要に応じてフライアッシュやアルカリ刺激材を添加して製造される。

鉄鋼スラグ水和固化体は、セメントや天然骨材を使用せずにリサイクル材料のみを原料としている²⁾。鉄鋼スラグ水和固化体の結合材は、主に高炉スラグ微粉末であり、骨材には製鋼スラグを用いる。製鋼スラグは、鉄鋼スラグ水和固化体全体の 60% (質量比) を占め、固化体の性質を決定している。製鋼スラグは、精錬設備、精錬方法等の違いにより様々な製鋼スラグが発生する。また、製鋼スラグは、水硬性とともに、膨張しやすい性質を持っているため、エージングによって、その膨張を抑える必要がある³⁾。エージングには、一定期間雨露にさらす自然エージングと、高温蒸気にさらす蒸気エージングが

ある。アルカリ刺激材には、消石灰や各種セメントなどが挙げられるが、水酸化カルシウムや酸化カルシウムを含んだ副産物も利用可能である²⁾。

鉄鋼スラグ水和固化体は、セメントを用いない点で通常のコンクリートと異なるが、配合は普通コンクリートと同様に、強度推定指標として水粉体比が用いられている³⁾。しかし、鉄鋼スラグ水和固化体に使用する材料のばらつきにより、鉄鋼スラグ水和固化体の性能のばらつきも大きいことが知られている。

そこで本研究では、鉄鋼スラグ水和固化体を安定に製造することを目的に、練混ぜ直後の pH が、固化体の強度および耐久性に及ぼす影響を調べた。耐久性試験は、中性化試験、乾燥収縮ひずみの測定および鉄筋腐食試験を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本研究で使用した鉄鋼スラグ水和固化体の配合を表 1 に示す。高炉スラグ微粉末は、JIS A 6206 に規定されている高炉スラグ微粉末 4000

*1 岡山大学大学院 自然科学研究科地球・環境システム科学専攻 工修 (正会員)

*2 ランデス (株) 企画開発本部研究所主任研究員 (正会員)

*3 岡山大学大学院 自然科学研究科地球・環境システム科学専攻助教授 工博 (正会員)

*4 岡山大学大学院 自然科学研究科地球・環境システム科学専攻教授 工博 (正会員)

表－１ 鉄鋼スラグ水和固化体の配合

製鋼スラグ の最大寸法 (mm)	水粉体比 <i>W/P</i> (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)						高性能 減水剤 <i>SP</i>
			水 <i>W</i>	粉体 <i>P</i>		溶銑予備処理スラグ <i>PTC</i>			
				高炉スラ グ微粉末 <i>BP</i>	石灰集塵 微粉末 <i>LD</i>	0mm ~5mm	5mm ~13mm	13mm ~20mm	
20	23.7	2.0	150	634	0	958	574	383	9.58
20	23.5	2.0	150	598	39	958	574	383	9.58
20	23.4	2.0	150	562	78	958	574	383	9.58
20	23.3	2.0	150	536	107	958	574	383	9.58
20	23.3	2.0	150	526	117	958	574	383	9.58

表－２ 天然骨材を用いた水和固化体の配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	水粉体比 <i>W/P</i> (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)						高性能 減水剤 <i>SP</i>
			水 <i>W</i>	粉体 <i>P</i>		川砂 <i>S</i>	砕石 <i>G</i>		
				高炉スラ グ微粉末 <i>BP</i>	石灰集塵 微粉末 <i>LD</i>		5mm ~13mm	13mm ~20mm	
20	23.7	2.0	150	634	0	808	485	324	9.58
20	23.6	2.0	150	625	9.7	808	485	324	9.58
20	23.6	2.0	150	620	15	808	485	324	9.58
20	23.6	2.0	150	616	20	808	485	324	9.58
20	23.6	2.0	150	607	30	808	485	324	9.58
20	23.5	2.0	150	598	39	808	485	324	9.58
20	23.4	2.0	150	562	78	808	485	324	9.58
20	23.3	2.0	150	536	107	808	485	324	9.58

(密度：2.89g/cm³)を用いた。製鋼スラグは、エージング処理を行い、JIS A 5015 附属書 2 による水浸膨張比が 1.1%以下になった溶銑予備処理スラグを用いた。溶銑予備処理スラグは、粒径が 0~5mm のもの (密度：3.06g/cm³，吸水率：7.41%)，5~13mm のもの (密度：3.22g/cm³，吸水率：4.84%)，13~20mm のもの (密度：3.21g/cm³，吸水率：4.20%) に分級して用いた。アルカリ刺激材は、石灰集塵微粉末 (密度：3.14g/cm³，500μm 未満) を用いた。単位水量は 150kg/m³ で、単位溶銑予備処理スラグ量は 1,915kg/m³ である。石灰集塵微粉末は、高炉スラグ微粉末と容積一定で置換した。混和剤には、ポリカルボン酸系高性能減水剤を用いた。混和剤の添加量は、スランプフローが 600±50mm となるように決定した。天然骨材を用いた水和固化体は、鉄鋼スラグ水和固化体中の粒径が 0~5mm，5~13mm および 13~20mm の溶銑予備処理スラグを、それぞれ、川砂 (密度：2.58g/cm³，吸水率：1.95%)，粒径が 5~13mm の砕石 (密度：2.72g/cm³，吸水率：

1.02%) および粒径が 13~20mm の砕石 (密度：2.72g/cm³，吸水率：0.83%) に容積一定で置換した。本研究で用いた天然骨材を用いた水和固化体の配合を表－２に示す。セメントコンクリートは、水セメント比を 60%，細骨材率を 47.7%，単位水量を 175kg/m³ とした。セメントコンクリートのセメントは、普通ポルトランドセメントを、骨材は川砂および砕石を用いた。

2.2 耐久性試験

中性化試験に用いた供試体は、材齢 4 日まで水中養生を行った。試験開始時材齢は、7 日で、温度 30℃，湿度 60%，CO₂ 濃度 20% の条件で試験を行った。

乾燥収縮試験には、100×100×400mm の角柱供試体を用いた。供試体は、材齢 1 日まで型枠内で養生した後、温度 20℃，湿度 60% の恒温恒湿度室内で測定を行った。

鉄筋腐食試験は、図－１に示すような円柱供試体を用いた。鉄筋は、φ13mm の丸鋼を用いた。かぶりは、10mm および 20mm とした。供試体は、

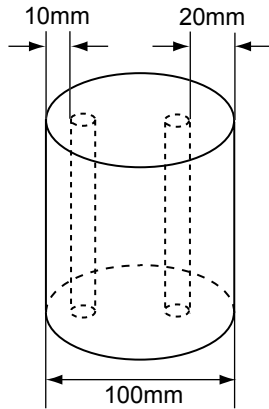


図-1 鉄筋腐食供試体

材齢 4 日まで水中養生を行い、両円断面をエポキシ樹脂でコーティングした後、材齢 7 日から試験を開始した。塩分濃度が 3%の人工海水に 3 日間浸漬させ、温度が 60℃の乾燥炉で 4 日間乾燥させる 7 日間を 1 サイクルとした。

2.3 pH の測定

練混ぜ直後の pH 測定には、フレッシュ時のペースト部分を 20g 採取し、質量比で 10 倍に精製水で希釈した溶液を用いた。溶銑予備処理スラグの pH 測定では、溶銑予備処理スラグを 50g 採取し、質量比で 10 倍の精製水にスラグを浸漬、攪拌した溶液の pH を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

図-2 は、鉄鋼スラグ水和固化体および天然骨材を用いた水和固化体の材齢 28 日における圧縮強度と石灰集塵微粉末の添加量の関係を示したものである。ただし、図中の●は、鉄鋼スラグ水和固化体の結果を、■は、天然骨材を用いた水和固化体の結果を示している。この図から、天然骨材を用いた水和固化体は、石灰集塵微粉末が無添加の場合には硬化しないことが分かる。しかし、鉄鋼スラグ水和固化体は、石灰集塵微粉末が無添加のときも硬化しており、石灰集塵微粉末の添加量が圧縮強度に及ぼす影響は、小さいことが分かる。水和固化体の練混ぜ直後の pH と圧縮強度の関係を調べた図-3 からは、練混ぜ直後の pH と圧縮強度の関係は、いずれの水

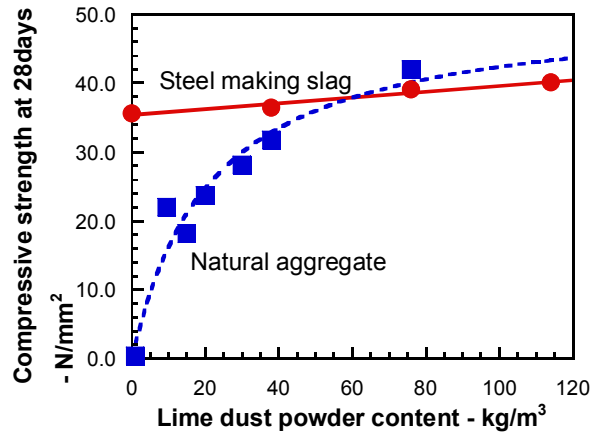


図-2 石灰集塵微粉末の添加量と圧縮強度の関係

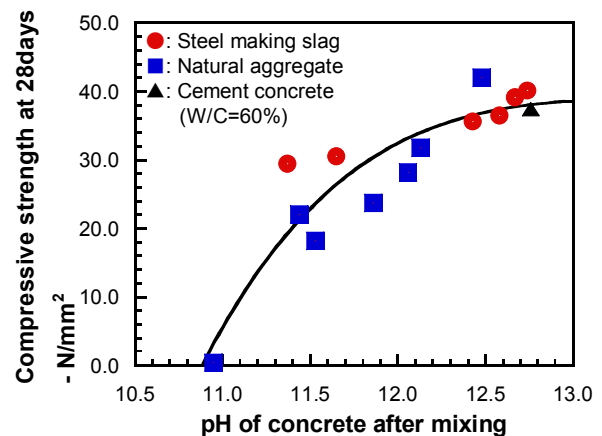


図-3 練混ぜ直後の pH と圧縮強度の関係

和固化体でも、一つの曲線上にあると言える。図中の●は、鉄鋼スラグ水和固化体の結果を、■は、天然骨材を用いた水和固化体の結果を、▲は、水セメント比が 60%のセメントコンクリートの結果を示している。

3.2 中性化

図-4 は、天然骨材を用いた水和固化体の中性化試験結果を示したものである。ただし、図中の○、□、△および●は、それぞれ、石灰集塵微粉末の添加量が、15kg/m³、20kg/m³、30kg/m³ および 78kg/m³ の時の結果を示している。図の横軸は、中性化期間の平方根を用いている。この図から、石灰集塵微粉末の添加量が少ないほど、直線の傾きが大きく、中性化が進みやすいことが分かる。

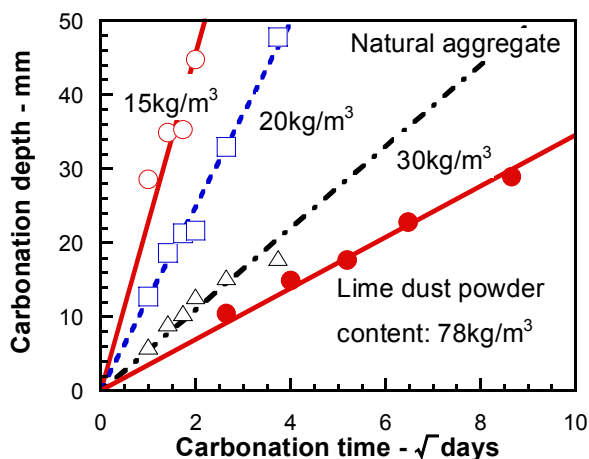


図-4 天然骨材を用いた水和固化体の中性化試験結果

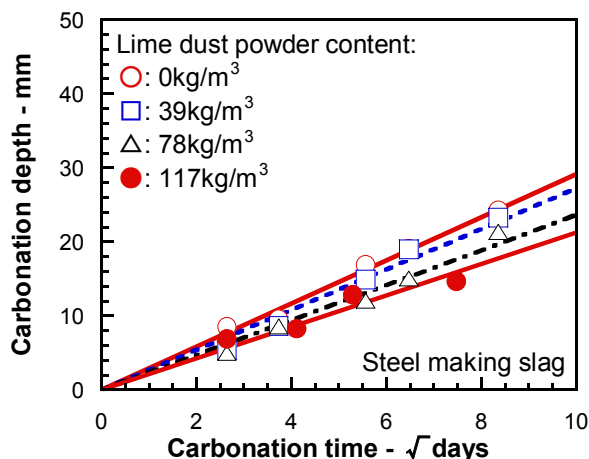


図-5 鉄鋼スラグ水和固化体の中性化試験結果

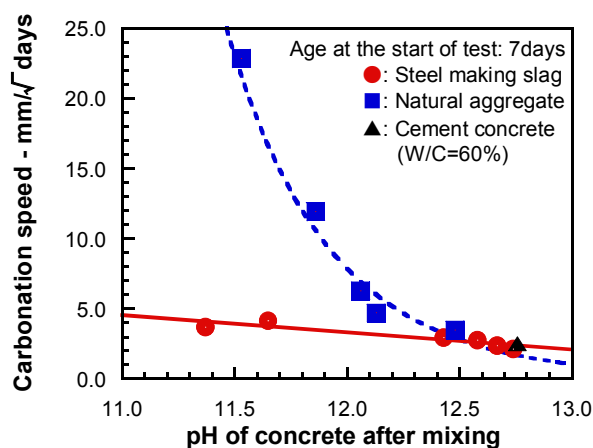


図-6 練混ぜ直後の pH と中性化速度の関係

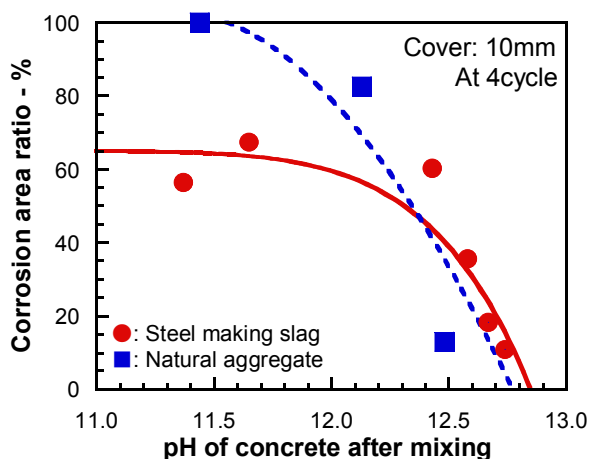


図-7 練混ぜ直後の pH と鉄筋の腐食面積率の関係

一方、鉄鋼スラグ水和固化体の中性化試験結果を図-5に示す。ただし、図中の○、□、△および●は、それぞれ、石灰集塵微粉末の添加量が、 0kg/m^3 、 39kg/m^3 、 78kg/m^3 および 117kg/m^3 の時の結果を示している。図の横軸は、中性化期間の平方根を用いている。この図から、鉄鋼スラグ水和固化体では、石灰集塵微粉末の添加量の影響は、小さいことが分かる。

図-6は、鉄鋼スラグ水和固化体および天然骨材を用いた水和固化体の練混ぜ直後の pH と中性化速度の関係を示したものである。中性化速度は、図-4および図-5に示される直線の傾きである。図中の●は、鉄鋼スラグ水和固化体の結果を、■は、天然骨材を用いた水和固化

体の結果を示している。図中の▲は、水セメント比 60%のセメントコンクリートの結果を示している。この図から、天然骨材を用いた水和固化体では、練混ぜ直後の pH が低くなると、中性化速度が大きくなるのに対し、鉄鋼スラグ水和固化体では、練混ぜ直後の pH の影響は小さいことが分かる。

3.3 鉄筋腐食

図-7は、鉄鋼スラグ水和固化体および天然骨材を用いた水和固化体の練混ぜ直後の pH と鉄筋腐食試験 4 サイクル終了時のかぶり 10mm の鉄筋の腐食面積率の関係を示したものである。図中の●は、鉄鋼スラグ水和固化体の結果を、■は、天然骨材を用いた水和固化



写真-1 セメントコンクリート中の鉄筋

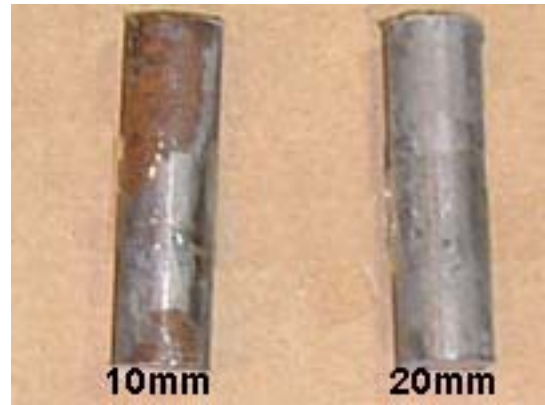


写真-2 鉄鋼スラグ水和固化体中の鉄筋

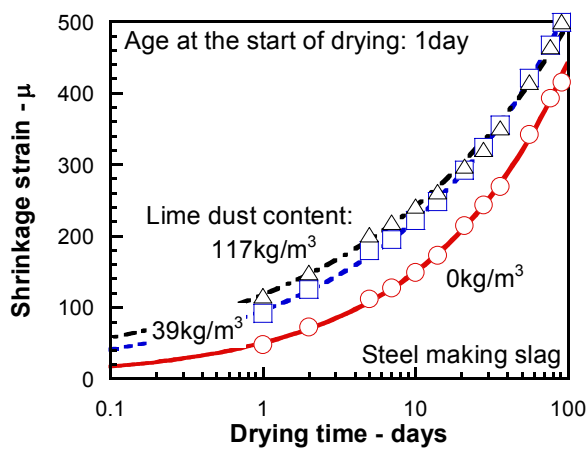


図-8 鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみ試験結果

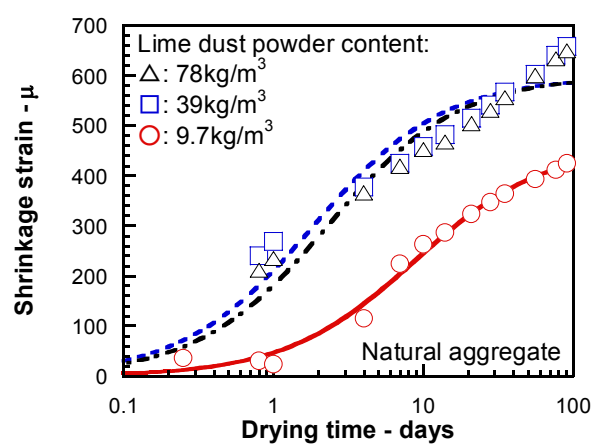


図-9 天然骨材を用いた水和固化体の乾燥収縮ひずみ試験結果

結果を示している。この図から、練混ぜ直後の pH が低い場合において、鉄鋼スラグ水和固化体は、天然骨材を用いた水和固化体に比べて鉄筋腐食に対する抵抗性は、大きいことが分かる。

写真-1 および写真-2 は、それぞれ、セメントコンクリートおよび鉄鋼スラグ水和固化体の鉄筋腐食試験 15 サイクル終了時における鉄筋の写真である。鉄鋼スラグ水和固化体の石灰集塵微粉末の添加量は、 78kg/m^3 である。セメントコンクリートの水セメント比は 60% である。鉄筋のかぶりは、10mm および 20mm である。セメントコンクリート中の鉄筋は、いずれのかぶりの鉄筋も腐食していた。鉄鋼スラグ水和固化体中の鉄筋は、かぶりが 10mm のものは腐食しているのに対し、かぶりが 20mm のものは腐食していなかった。

3.4 乾燥収縮ひずみ

図-8 は、鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。図中の○、□および△は、それぞれ、石灰集塵微粉末の添加量が、 0kg/m^3 、 39kg/m^3 および 117kg/m^3 の結果を示している。この図から、石灰集塵微粉末の添加量が多くなるほど乾燥収縮ひずみが大きくなることが分かる。

図-9 は、天然骨材を用いた水和固化体の乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。図中の○、□および△は、それぞれ、石灰集塵微粉末の添加量が、 9.7kg/m^3 、 39kg/m^3 および 78kg/m^3 の結果を示している。この図から、鉄鋼スラグ水和固化体の場合と同様に、石灰集塵微粉末の添加量が多くなるほど乾燥収縮ひずみが大きくなることが分かる。

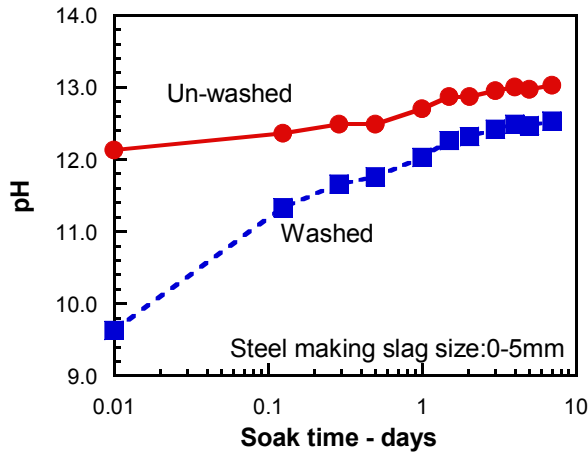


図-10 溶銑予備処理スラグを精製水に浸漬させた溶液の pH の経時変化

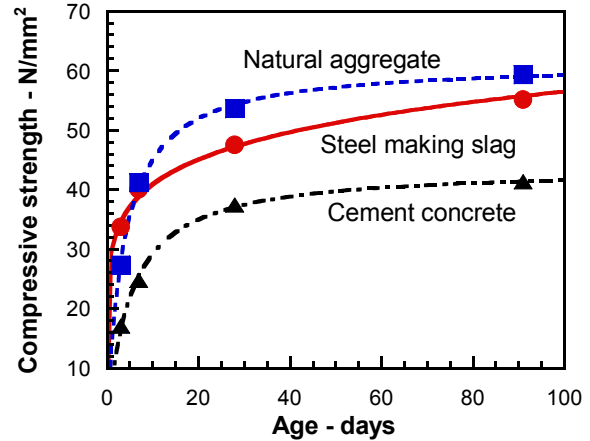


図-11 圧縮強度の経時変化

3.5 製鋼スラグからのアルカリ性成分の溶出

図-10 は、溶銑予備処理スラグを精製水に浸漬させた溶液の pH の経時変化を示したものである。図中の●は、水洗処理していないものの結果を、■は、水洗処理を行ったものの結果を示している。水洗処理を行ったものも時間が経つにつれて、溶液の pH が上昇することが分かる。水洗した溶銑予備処理スラグにフェノールフタレイン溶液を噴霧すると、噴霧直後は、赤く発色しなかったが、6 時間後には赤く発色しており、アルカリ性成分が溶出していることが分かる。

図-11 に、鉄鋼スラグ水和固化体、天然骨材を用いた水和固化体およびセメントコンクリートの圧縮強度の経時変化を示す。図中の●は、鉄鋼スラグ水和固化体の結果を、■は、天然骨材を用いた水和固化体の結果を、▲は、水セメント比が 60%のセメントコンクリートの結果を示している。鉄鋼スラグ水和固化体および天然骨材を用いた水和固化体の石灰集塵微粉末の添加量は、いずれも 107kg/m^3 である。この図から、天然骨材を用いた水和固化体およびセメントコンクリートに比べて、鉄鋼スラグ水和固化体の方が長期強度の伸びが大きいことが分かる。

以上のことから、鉄鋼スラグ水和固化体では、溶銑予備処理スラグ中のアルカリ性成分が溶出してくるため、長期にわたって強度が増進する。

また、中性化および鉄筋腐食は、練混ぜ直後の pH が同じであっても、天然骨材を用いた水和固化体に比べて、優れることが分かった。

4. まとめ

鉄鋼スラグ水和固化体の強度は、練混ぜ直後の pH に依存することが分かった。練混ぜ直後の pH をセメントコンクリートと同程度の 12.5 以上になるように、アルカリ刺激材の添加量を調整することで、安定して強度が発現することが分かった。また、骨材に溶銑予備処理スラグを用いた場合には、溶銑予備処理スラグから溶出するアルカリ性成分によって、天然骨材を用いた場合よりも、中性化が小さく、水和固化体中の鉄筋の錆も発生しにくいことが分かった。

参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報 平成 14 年版, 2003
- 2) 松永久宏ほか：鉄鋼スラグを利用した環境に優しい固化体の開発, コンクリート工学, Vol.41, No.4, pp.47-54, 2003.4
- 3) (財)沿岸開発技術研究センター：鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル－製鋼スラグの有効利用技術－, 沿岸開発技術ライブラリーNo.16, 2003.3